

펄스 방전에 의해 확공된 앵커의 인발 거동에 대한 수치 해석

Numerical Analysis of Uplift Behavior of Anchor Expanded by Pulse Discharge Technology

박현구¹⁾, Hyunku Park, 이승래²⁾, Seung-Rae Lee, 김태훈³⁾, Tae-Hoon Kim

¹⁾ 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST

²⁾ 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수, Full Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST

³⁾ 대우건설(주) 기술연구원 선임연구원, Senior Researcher, Daewoo Institute of Construction Technology

SYNOPSIS : 본 연구에서는 펄스 방전 기술에 의해 확공된 앵커의 인발 거동에 대한 수치해석을 수행하였다. 펄스 방전 현상을 등가의 폭발 현상으로 모델링하여 점성토와 사질토 지반에 대한 확공해석을 수행하였으며 이를 통해 펄스 방전에 의해 개량된 지반 조건을 구현하였다. 확공된 지반에 대해 설치된 압축형 그라우트 앵커의 인발 거동을 시뮬레이션하여 인발력-인발변위 곡선을 산정하였다. 해석 결과, 점성토의 경우에는 확공 정도가 인발 거동과 밀접한 관련을 갖는 반면, 사질토의 경우에는 확공 정도 이외의 추가적인 증가 요인이 확인되는 것으로 나타났으며 펄스 방전 기술이 사질토 지반의 다짐을 통해 앵커의 인발력을 증가시키는 것으로 판단되었다.

Key words : pulse discharge, ground anchor, uplift force, numerical simulation, finite element analysis

1. 서 론

펄스 방전 기술(pulse discharge technology, PDT)은 매우 짧은 시간에 전기 방전을 일으키는 기술로써 최근 들어 현장 타설 말뚝 및 앵커 시공 시 말뚝 선단 및 앵커 정착장에 구근을 형성하여 저항력을 증대시키는데 적용되고 있다(김태훈 등, 2007). 일반적으로 펄스 방전은 말뚝 및 앵커 시공을 위해 형성된 시추공에 그라우트를 채운 후 수행되며, 이로 인하여 시추공을 채우고 있는 채움 재료에 수 MPa 크기의 충격파(shockwave)가 발생되게 되고 그 결과 천공부가 확공되어 그라우트 말뚝 및 앵커의 구근을 얻을 수 있게 된다. PDT 적용에 따른 시추공의 확공 거동에 대해 김태훈 등 (2007)은 현장시험 결과로부터 점성토와 사질토에 대한 확공 정도를 지반의 표준관입시험(Standard Penetration Test, SPT) 값에 근거하여 분류하였으며, 구형 확공 형상이라는 가정 아래 식 (1)과 같은 확공 계수(coefficient of expansion, E_c)를 제안하였다.

$$E_c = d_{\text{expanded}} / d_0 \quad (1)$$

여기서, d_{expanded} 는 확공된 시추공의 직경이고 d_0 는 확공전 시추공의 직경을 의미한다.

PDT가 적용된 말뚝 및 앵커의 지지 거동과 관련하여 허억준 등(2006)은 기존 Shaft형 말뚝에 비해 PDT에 의해 구근이 형성된 말뚝이 더 큰 저항거동을 나타냄을 현장 적용 사례로부터 확인하였다. 또한, 김낙경 등 (2009)은 풍화토 및 모래질 점토지반에서 펄스 방전에 의해 확공된 압축형 앵커에 대해 인발시험을 수행하여 펄스 방전에 따른 확공 정도와 인발력 증가 경향을 평가하였다. 한편, PDT는 지반에 매우 큰 규모의 충격과 압력을 가하여 지반을 확공·다짐시키기 때문에 일반적인 그라우트 가압 형식의 마찰형 앵커 및 선단굴착을 통해 구근이 형성된 앵커와는 그 저항 특성이 다를 것으로 예상된다. 그러나 아직까지 PDT의 적용사례가 그리 많지 않기 때문에 기 보고된 재하 및 인발 시험 결과로부터 PDT가 적용된 말뚝 및 앵커의 저항 메커니즘을 정성적으로 분석하는 것은 어려운 실정이다.

위와 같은 이유로 본 연구에서는 펄스 방전에 의해 확공된 앵커의 인발 거동을 살펴보기 위하여 사질토와 점토 지반에 연직방향으로 설치된 펄스 확공형 앵커의 인발 거동 문제에 대해 ABAQUS (2004)를 이용, 유한요소 수치해석을 수행하였다. 펄스 방전에 의해 확공된 지반의 상태를 고려하기 위하여 충격파에 의한 지반 확공 해석을 수행하고 확공 해석 결과로부터 얻어진 지반 조건에서의 그라우트 앵커 인발 해석을 수행하였으며 해석 결과를 김낙경 등(2009)의 현장 시험 결과와 비교하여 수치해석의 적절성을 살펴보았다.

2. 유한요소해석

2.1 대상 문제 및 지반 조건

본 연구에서는 연직방향으로 8m 깊이로 천공된 125mm 직경을 갖는 시추공에 시멘트 페이스트가 2m 가량 채워진 조건에 대하여 시추공 선단으로부터 1m 높이에서 수행된 펄스 방전에 의한 지반의 확공 및 그 후 설치된 앵커의 인발 거동을 대상으로 설정하였다. 해석은 크게 펄스 방전에 의해 확공된 지반의 상태를 얻기 위한 확공 해석과, 그 결과로 얻어진 지반 상태를 고려한 앵커 인발 거동 해석으로 나누어 수행되었다. 지반은 크게 비배수 상태의 포화된 점성토와 건조된 사질토 두 가지 지반조건을 고려하였으며 표 1은 지반 및 앵커에 대한 재료모델 및 해당 변수로써 표에 나타난 바와 같이 지반재료의 물성 변수는 SPT N값과의 경험적 상관관계로부터 추정되었고 그라우트 및 강선의 물성은 Neville (1996)이 제안한 바를 참고하여 산정되었다.

표 1. 해석에 적용된 지반 및 앵커체 물성

재료	구성 모델	탄성계수 (kPa)	일축항복응력 (kPa)	마찰각 (°)
점성토	선형탄성-완전소성 von-Mises 항복기준	$G=f(PI) \times s_u^{1)}$	$q=2s_u=N_{SPT}/6^{3)}$	
사질토	선형탄성-완전소성 Drucker-Prager 항복기준	$E=780N_{SPT}^{2)}$		$\phi = 0.3N+27^{4)}$
강선	선형탄성	EA=11,900		
그라우트	선형탄성-완전소성 von-Mises 항복기준	21GPa	20,000	

¹⁾ Keaveny와 Mitchell (1986), ²⁾ Schmertmann (1970), ³⁾ Peck (한국 지반공학회에서 재인용), ⁴⁾ Terzaghi와 Peck (1967)

2.2 해석 방안

2.1.1 확공 해석

펄스방전으로 인해 유발되는 충격파에 의한 지반 확공 현상을 모델링하기 위하여 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS/Explicit의 수중폭발모델인 UNDEX 모델을 통해 충격파를 모델링하였고, 유체-구조물 연동해석 (coupled acoustic-structural analysis) 기법을 적용하여 지반의 변형거동을 모사하였다. 이때 시멘트 페이스트를 통한 충격파 전달을 모사하기 위하여 4절점 acoustic 요소를 이용하였고 지반의 거동은 4절점 연속체 요소를 이용하여 모델링하였다. UNDEX 모델 변수, 유체-지반 경계 및 유한요소망 외부 경계에서의 acoustic 경계조건, 지반 초기조건 등과 관련된 세부적인 사항은 각각 박현구 등 (2009, 2010)의 점성토와 사질토에서의 확공 해석과 동일하게 설정하였다. 그림 1은 8m 깊이까지 천공된 125mm의 직경을 갖는 시추공에 대한 축대칭 유한 요소망으로써 해석의 안정성을 고려하기 위하여 시추공 내부를 채우고 있는 유체요소 및 인접 지반 요소를 25mm × 25mm 크기로 세밀하게 분할하였으며, 방전 위치로부터 횡방향으로 약 2m 및 연직방향 10m 이후의 해석영역에는 4절점 무한요소를 사용하여 외부 경계에서의 응력과 반사 및 내부 영역으로의 전파를 최소화 하였다.

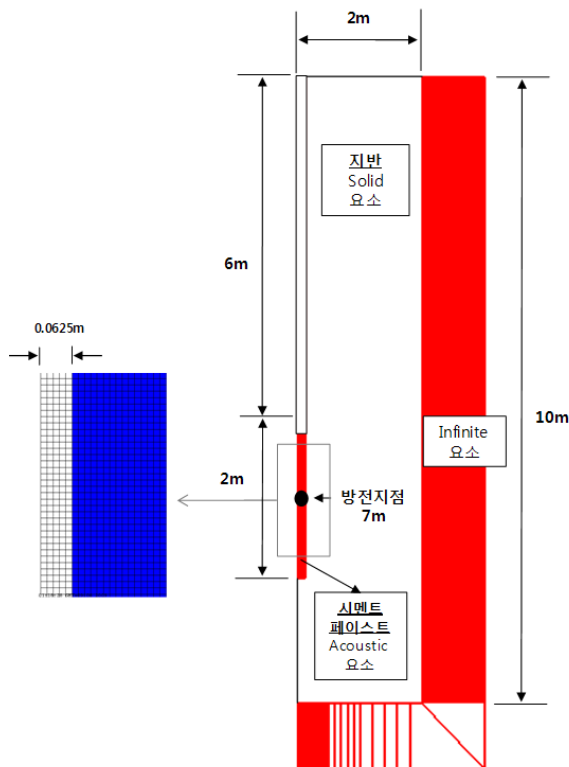


그림 1. 확공해석을 위한 유한요소망

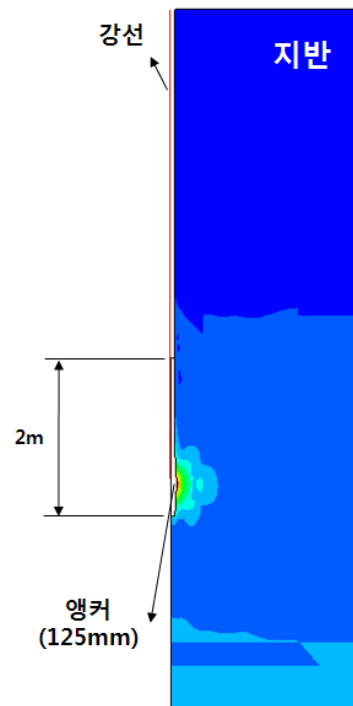


그림 2. 확공해석 후 지반 조건 및 앵커 형상

2.1.2 앵커 인발 해석

펄스 방전에 의해 확공된 지반의 상태를 고려한 인발해석을 수행하고자 앞서 수행된 확공 해석으로부터 얻어진 지반 상태를 바탕으로 ABAQUS/Standard를 이용한 인발해석을 수행하였다. 확공에서 인발로 이어지는 연속적인 해석을 위하여 확공해석이 이루어진 ABAQUS/Explicit의 해석으로부터 얻어진 지반의 변형 및 응력 상태를 [*IMPORT] 옵션을 통해 ABAQUS/Standard로 전달한 후 확공 해석 시 시멘트 페이스트를 모사하였던 acoustic 요소를 4절점 연속체 요소의 특성을 갖는 그라우트 앵커체 (정

착장 2m)로 치환하였다. 또한, 압축형 앵커 거동을 모델링하기 위하여 강선이 앵커의 선단부의 강체 요소와 연결된 것으로 가정하였으며 이때 강선은 선단부 중심부 절점과 지표면에 놓인 시추공 중심절점을 연결한 1차원 스프링 요소로 나타내었다 (그림 2). 인발해석 시 지반-그라우트 간 상호거동은 사질토에 대해서만 식 (2)와 같은 일반적인 Coulomb 마찰거동이 가정되었으며 마찰계수는 식 (3)으로부터 계산하였다.

$$\tau = \mu\sigma \quad (2)$$

$$\mu = \tan\phi \quad (3)$$

여기서 τ 는 경계면에서의 마찰력, μ 는 마찰계수, σ 는 경계면에서의 수직응력, 그리고 ϕ 는 지반의 마찰각을 의미한다.

3. 해석 결과

3.1 점성토

그림 3은 SPT N값이 각각 4, 6, 및 8인 점성토 지반에 대해 0~5회 펄스 방전 확공이 이루어진 후 앵커 인발 해석을 수행하여 산정된 인발하중-잔류변위 곡선(정착장 선단 변위)을 나타낸 것이다. 펄스 방전이 수행된 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 하중-변위 곡선이 더 큰 인발하중에서 항복점이 나타남을 확인할 수 있다. 그러나 1회 방전 이후에는 방전 횟수의 증가에 따른 인발력 증가는 미미한 것으로 나타났다. 한편, 확공되지 않은 경우 하중-변위 곡선이 일정 수준 이상의 인발력에서 극한 상태에 도달하는 것을 보이는 반면, 펄스 방전이 수행된 경우에는 잔류 변위 증가에 따라 인발 하중이 미소하게나마 계속적으로 증가함을 확인할 수 있다.

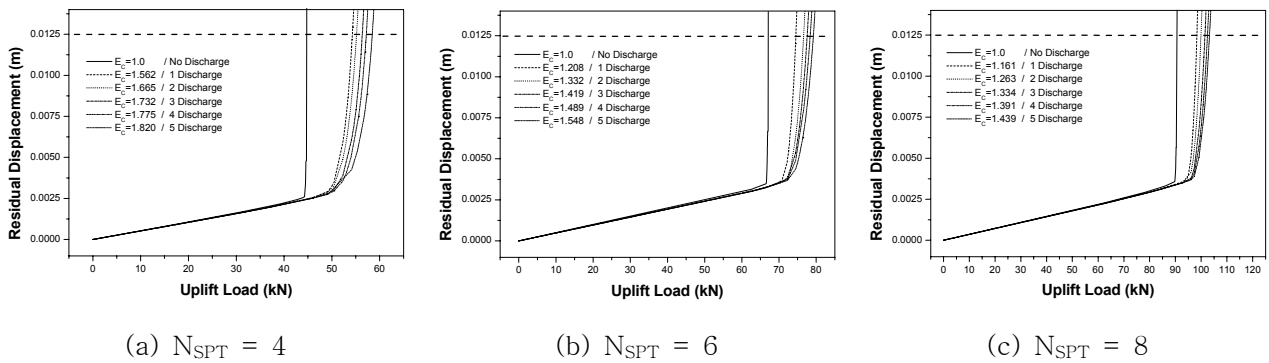
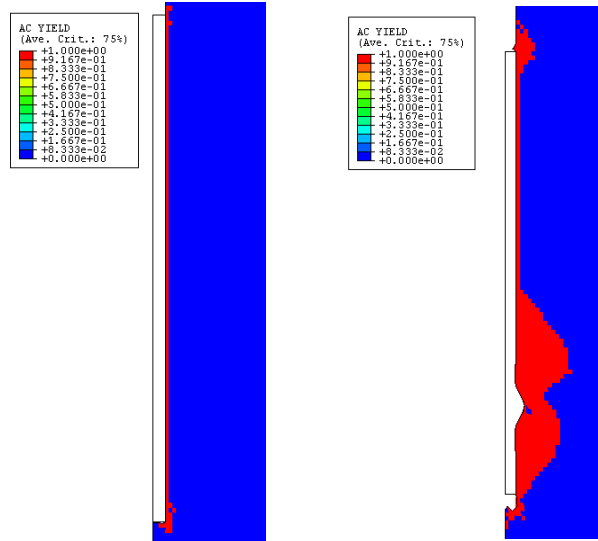


그림 3. 점성토 지반에서 예측된 인발하중-잔류변형 곡선

그림 4는 SPT N값이 6인 지반에 대한 확공-인발해석에서 얻어진 항복영역을 비교한 것으로 확공된 경우가 확공되지 않은 앵커에 비해 더 넓은 항복영역을 보이고 있음을 확인할 수 있으며 특히 확공부 주변 부위에 항복이 집중적으로 유발됨을 확인할 수 있다. 일반 마찰형 앵커는 앵커에 접하고 있는 지반 요소에서만 항복이 유발되는 거동임에 비하여 확공된 앵커는 확공부로 인해 주변부 흙요소의 지지 저항이 추가적으로 발생하여 더 넓은 항복 영역이 유발된 것으로 이해될 수 있다.

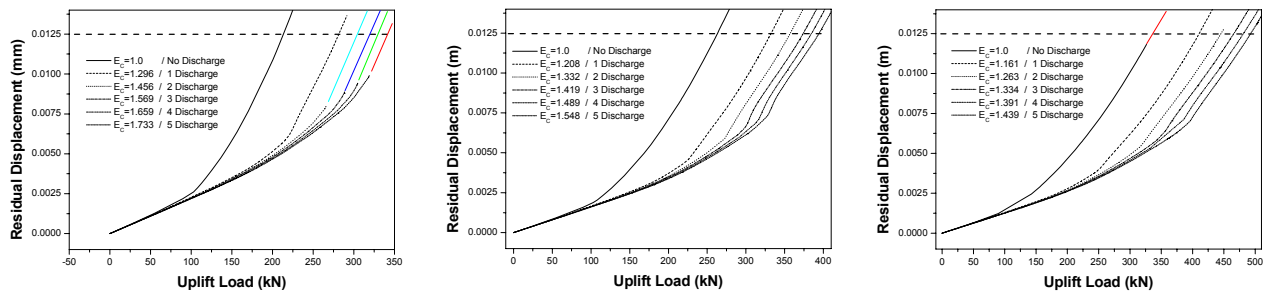


(a) 확공되지 않은 경우 (b) PDT로 확공된 경우

그림 4. 앵커 인발시 항복영역 (점성토)

3.2 사질토

그림 5는 $N_{SPT}=20, 30, \text{ 및 } 40$ 인 사질토 지반에 대해 0~5회의 펄스 방전 확공 해석 결과를 바탕으로 수행된 앵커 인발 해석으로부터 얻어진 인발하중-잔류변위 곡선을 나타낸 것이다. 앞서 점성토 해석 결과와는 달리 펄스 방전이 수행됨에 따라 하중-변위 곡선의 항복하중 증가가 뚜렷하게 나타남을 확인할 수 있으나 방전 횟수가 증가함에 따라 그 증가 경향은 감소하고 있음을 알 수 있다.



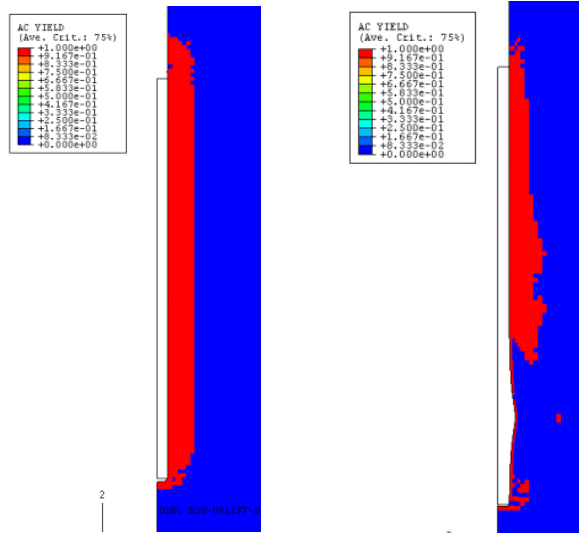
(a) $N_{SPT} = 20$

(b) $N_{SPT} = 30$

(c) $N_{SPT} = 40$

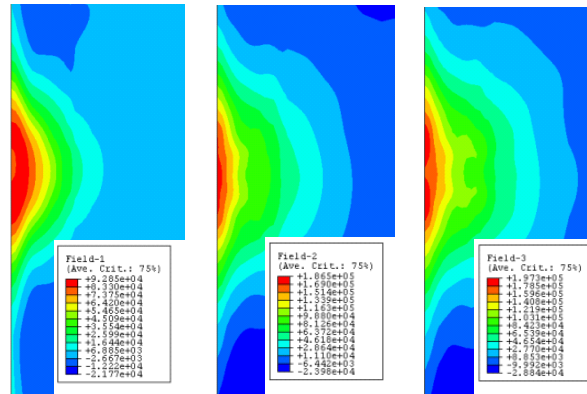
그림 5. 사질토 지반에서 예측된 인발하중-잔류변형 곡선

그림 6은 SPT N값이 20인 지반에 대한 인발해석에서 얻어진 항복영역을 비교한 것으로 확공된 경우 마찰형 앵커와는 달리 확공된 영역 주위 항복 영역이 감소한 것으로 나타났다. 그림 7은 사질토 지반에서 확공부 주변 지반의 평균 유효응력의 변화를 나타낸 것으로 방전 횟수 증가에 따라 평균 유효응력이 증가함을 확인할 수 있다. 따라서, 펄스 방전에 의한 충격과로 인한 지반 다짐이 유발되며 이는 지반의 파괴 응력을 증가시켜 앵커 인발 시 항복 거동이 적게 유발된 것으로 판단된다.



(a) 확공되지 않은 경우 (b) PDT로 확공된 경우

그림 6. 앵커 인발시 항복영역 (사질토)



방전 1회 방전 10회 방전 20회

그림 7. 방전횟수에 따른 평균유효응력 변화

3.3 현장 시험 결과와의 비교

수치 해석에서 얻어진 인발력-잔류변형 곡선으로부터 Briaud 등(1998)의 제안에 따라 산정한 극한 인발력(앵커 직경의 10% 잔류하중 유발 하중)을 김낙경 등(2009)이 풍화토 지반에서 수행한 현장 시험 결과와 그림 8과 같이 비교해보았다. 거의 유사한 확공 계수-극한 인발력 관계를 보임을 알 수 있으며 특히 김낙경 등(2009)이 현장시험을 수행한 풍화토지반의 SPT N값이 25에서 35사이에 분포하고 있음을 고려해 볼 때 본 연구에서 수행한 인발해석이 합리적으로 인발력을 예측하고 있는 것으로 판단된다.

한편, 본 연구에서는 김낙경 등(2009)이 실험을 수행한 지반에 구형의 구근(bulb)이 형성되어 묻혀진 앵커의 인발 거동 해석을 수행하였으며 그로부터 얻어진 극한 인발력이 그림 8에 도시되어 있다. 구형 구근의 확공 정도 증가에 따른 인발력 증가영향이 미비한 것으로 나타난 것을 확인할 수 있으며 이는 실제 시험에서 얻어진 인발력 증가가 단순한 구근 존재 여부에 의한 영향이 아닌 펄스 방전에 의해 발생하는 충격과에 따른 지반의 변형 및 응력 변화에 주로 기인하는 것으로 이해될 수 있다.

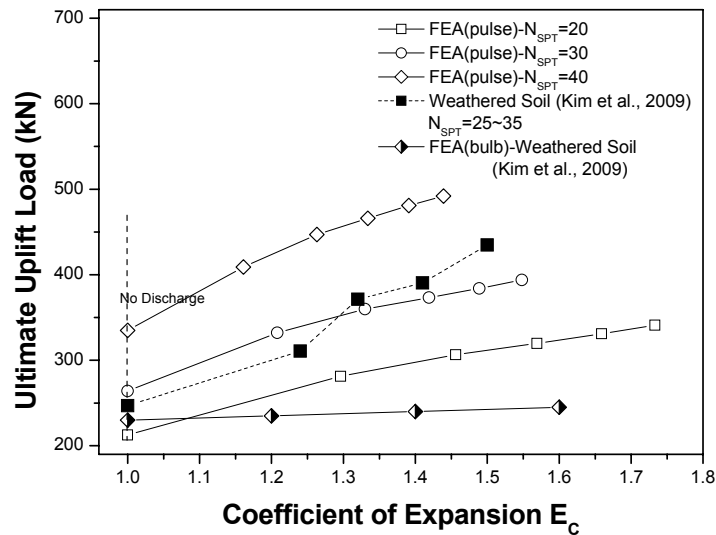


그림 8. 인발 해석 결과로부터 예측된 극한 인발력과 현장시험(김낙경 등, 2009)의 비교

4. 결론

본 연구에서는 펄스 방전에 의해 확공된 앵커의 인발 거동을 살펴보기 위하여 사질토와 점토 지반에 설치된 펄스 확공형 앵커의 인발 거동 문제에 대해 유효요소 수치해석을 수행하였으며 그로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) PDT 적용에 의해 확공된 지반 조건을 고려하여 압축형 앵커의 인발 저항 시뮬레이션을 수행하였고 그 결과 PDT가 적용된 앵커는 일반적인 마찰형 앵커에 비하여 더 큰 인발 저항을 발현하는 것으로 예측되었으며 점성토에 비해 사질토 지반에서 PDT에 의한 인발력 증가효과가 더 큰 것으로 나타났다.

(2) PDT가 적용된 앵커 인발 중 유발되는 지반의 항복 거동은 점성토와 사질토에서 다르게 나타났다. 점성토의 경우 지반에 형성된 구근 주변 지반에 항복영역이 집중된 반면 사질토의 경우 확공 주변부에서 앵커와의 경계를 제외하고는 항복 영역이 거의 유발되지 않았다. 이는 비배수 점토 지반과 달리 사질토의 경우 지반의 체적압축 및 평균유효응력의 증가에 따른 강도 증진에 기인하는 것으로 판단된다.

(3) 사질토 지반에 대한 해석 결과를 김낙경 등(2009)의 현장 시험 결과와 비교해 보았으며 유사한 앵커 인발력이 예측됨을 확인할 수 있었으며 구형 구근이 형성된 앵커의 인발해석과 비교해보았을 때 사질토 지반에서 PDT가 적용된 앵커의 인발력 증가는 구근의 존재여부 보다는 체적 응력 증가로 인한 지반 강도 증가에 기인하는 것으로 판단되었다.

5. 참고 문헌

1. 김낙경, 김성규, 주용선, 서효균, 김선주 (2009), “펄스방전 그라우트 앵커의 확공특성 및 극한 인발력에 관한 연구”, 한국지반공학회 논문집, Vol. 25, No. 5, pp. 5~10
2. 김태훈, 차경섭, 김선주, 김유석, 김경오, 고부현 (2007), “펄스압에 의한 지반의 확공특성”, 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집, pp. 842~851
3. 박현구, 이승래, 김태훈 (2009), “펄스 방전에 의한 시추공 확공 현상에 대한 수치해석”, 한국지반공

- 학회 가을학술발표회 논문집, pp. 1346~1353
4. 박현구, 이승래, 김태훈 (2010), “펄스 방전에 의한 사질토지반 시추공 확공에 대한 수치해석”, 한국지반공학회 봄학술발표회 논문집, pp. 260~266
 5. 한국지반공학회 (2002), 굴착 및 흙막이 공법, 구미서관
 6. 허억준, 박재명, 윤수동, 김태훈 (2007), “경전선 복선전철 및 부산신항 노반건설공사 중 PDT말뚝 적용성 연구”, 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp. 1179~1202
 7. Briaud J. L., Powers, W. F., and Weatherby D. E. (1998), "Should grouted anchors have short tendon bond length?", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 124, No. 2, pp. 110~119
 8. Neville, A. M. (1996), "Properties of concrete 4th edition", Harlow (UK): Addition Wesley Longman Ltd.
 9. HKS (2004), Abaqus User Manual Version 6.5
 10. Keaveny, J. M. and Mitchell, J. K. (1986), "Strength of fine-grained soils using the piezocone", *Proceedings of the ASCE Specialty Conference In Situ '86: Use of In situ Tests in Geotechnical Engineering*, Blacksburg, pp. 668~685
 11. Schmertmann, J. H. (1970), "Static cone to Compute Static Settlement Over Sand", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 96, No. SM3, 1011~1043
 12. Terzaghi, K., and Peck, R. B. (1967), *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2nd ed., Wiley, New York